
Global Report

도시-지역수준의 산업공생체계 에서 폐기물 흐름 모델링: 중국 진창의 사례조사

1. 서론
2. 연구 사례들
3. 자료 및 방법
4. 결과
5. 결론 및 논의

1. 서론

세계적인 지속 가능한 개발 프로세스가 발전됨에 따라 환경법 및 규정들의 요구사항들이 지속적으로 증가하고, 폐기물 처리 비용, 인간 사회-경제 시스템의 기술 수준이 지속적으로 증가하여 폐기물의 잠재적 가치에 대한 이해가 향상되었다¹⁾. 폐기물은 더 이상 "가치가 없는 것"으로 간주되지 않는다. 대신에 폐기물은 점차 사람들에게 의해 자원의 대체물로 사용되고 있으며²⁾³⁾, 자원 활용은 폐기물 관리와 녹색 설계를 위한 혁신적인 접근법이 되었다⁴⁾⁵⁾⁶⁾. 향후 30년 내에 전 세계 폐기물 재활용으로 제공되는 원자재들은 약 30%~80%로 증가할 것으로 예상된다⁷⁾. 폐기물 회수, 재활용 및 최종 처리는 폐기물 관리의 마지막 처리단계이다. 하지만 '녹색'과 '저탄소'의 지속 가능한 발전의 관점에서 볼 때 현재 재활용 산업이 재활용 중심 사회 발전에 기여하는 부분은 여전히 제한적이다. 따라서, 보다 완벽한 폐기물 재활용 시스템과 효과적인 관리 도구들을 구축하는 일이 시급하다⁸⁾. 산업공생은 폐기물 재활용을 위한 혁신적인 개념으로 녹색 경제 성장을 촉진하고 자원 효율성을 향상시켰으며⁹⁾¹⁰⁾ 유럽 연합의 “Leading Resource Efficiency Initiative(선도적인 자원 효율성 발의)”에서 자원 효율성 확보를 위한 권장 방안으로 채택되었다. 지난 15년 동안 중국 내 정부기관들은 폐기물 재활용과 산업공생의 발전을 적극적으로 추진하기 위해 모든 수준에서 선형 경제를 보다 순환 경제로 전환하기 위한 정책들, 재정 조치들 및 법률을 채택해왔다¹¹⁾. 이러한 바탕 위에서 자원, 환경 및 경제의 지속적 개발을 도모하기 위해 산업공생 체계의 폐기물 흐름과 대사과정을 연구하고 산업 생태학의 발전과 환경 부담의 개선에 대한 감축, 재활용, 자원활용의 역할을 정량적으로 분석하는 것은 의미심장한 일이다.

폐기물 흐름은 재활용과 최종 처리도 고려해야 하는 재료 흐름의 일종이다¹²⁾. 폐기물 흐름의 분석 방법은 주로 폐기물 흐름과 흐름 방향을 분석하고 제품 폐기 후의 자원 처리에 신경을 쓴다. 폐기물 흐름 분석 방법에서 물질의 투입은 원료가 아닌 폐기물이고 산출물 또한 재활용 제품이다¹³⁾. 현재 폐기물 흐름 분석은 세 가지 흐름들(요소 흐름, 재료 흐름, 그리고 제품 흐름)과 5단계의 수준들(기업 폐기물, 산업별 폐기물(departmental waste), 지역 폐기물, 국가 폐기물, 세계적 폐기물)에 중점을 둔다. 분석 방법들로 주로 물질 흐름 분석(SFA, substance flow analysis), 재료 흐름 분석(MFA, material flow analysis) 및 재료 흐름 분석을 위한 통계 연구(STreams, tatistical research for analyzing material streams)을 포함한다. 예를 들어 Melo¹⁴⁾, Beers¹⁵⁾, Davis¹⁶⁾, Zhang¹⁷⁾, Yue¹⁸⁾, Chen¹⁹⁾ 등은 요소 흐

- 1) Van, S.; Stegeman, J.A.; Ekins, P. Limited climate benefits of global recycling of pulp and paper. *Nat. Sustain.* 2020, 1–8.
- 2) Xie, X.; Qin, S.; Gou, Z.; Yi, M. Can Green Building Promote Pro-Environmental Behaviours? The Psychological Model and Design Strategy. *Sustainability* 2020, 12, 7714.
- 3) Lu, C.; Ji, W.; Liu, Z.; Dong, S.; Xue, B. Synergistic Evaluation and Constraint Factor Analysis on Urban Industrial Ecosystems of Traditional Industrial Area in China. *Complexity* 2020, 2020, 1–16.
- 4) Huang, J.; Zhao, R.; Huang, T.; Wang, X.; Tseng, M.-L. Sustainable Municipal Solid Waste Disposal in the Belt and Road Initiative: A Preliminary Proposal for Chengdu City. *Sustainability* 2018, 10, 1147.
- 5) Lu, C.; Xue, B.; Lu, C.; Wang, T.; Zhang, Z.; Ren, W. Sustainability Investigation of Resource-Based Cities in Northeastern China. *Sustainability* 2016, 8, 1058.
- 6) Lu, W. Waste Recycling System Material Metabolism Analysis Model and Its Application. Ph.D. Thesis, Tsinghua University, Beijing, China, 2010.
- 7) Liu, G.; Lu, S.; Li, X. Literature Review on Industrial Symbiosis: The Perspective from Synergy Operation of Recycling. *Manag. Rev.* 2014, 26, 149–160.
- 8) Xue, B.; Chen, X.; Geng, Y.; Guo, X.; Lu, C.; Zhang, Z.; Lu, C. Survey of officials' awareness on circular economy development in China: Based on municipal and county level. *Resour. Conserv. Recycl.* 2010, 54, 1296–1302.
- 9) Chen, X.; Fujita, T.; Ohnishi, S.; Fujii, M. The Impact of Scale, Recycling Boundary, and Type of Waste on Symbiosis and Recycling. *J. Ind. Ecol.* 2012, 16, 129–131.
- 10) Zhao, R.; Liu, Y.; Zhang, N.; Huang, T. An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach. *J. Clean. Prod.* 2017, 142, 1085–1097.
- 11) Mathews, J.A.; Tan, H. Circular economy: Lessons from China. *Nature* 2016, 531, 440–442.
- 12) Lu, W.; Zhang, T. Research and Prospects of Waste Recycling. *Environ. Sci. Manag.* 2010, 35, 129–139.
- 13) Gao, H.; Dai, T. Metabolism framework on recycling system construction of municipal solid waste. *Recycl. Resour. Circ. Econ.* 2014, 7, 9–14.

를 분석(elemental flow analysis) 또는 재료 흐름 분석 방법들을 사용하여 폐금속들의 대사(metabolism)를 연구하였다. Byström²⁰⁾, Joosten²¹⁾, Heckert²²⁾, Bacha²³⁾ 등은 폐지와 폐목재의 흐름을 연구하기 위해 STREAMS 분석 방법과 다변량 회귀 모델을 채택했다. 또한 많은 학자들은 폐기물 재활용의 정도와 효율성을 경제체계에 반영하기 위해 폐기물 회수율과 폐기물 재활용율을 포함한 일련의 지표들을 수립하였다. 예를 들면 Hagen²⁴⁾과 Berglund²⁵⁾는 지역의 정책들, 지리적/인구학적 변수들, 사회·경제·환경적 질을 포함하는, 폐기물 재활용율에 영향을 미치는 요인들을 분석하였다. Byström²⁶⁾은 환경 부하 단위지수(ELU-index, environmental load unit index)를 사용하여 폐기물 배출과 재생 불가능한 자원의 사용으로 인한 환경부하를 설명하였다. 야마시타²⁷⁾는 자원의 품질과 사용시간을 측정하기 위해 각각 ‘소비 전 순환지수(Circulation Index, 이하 CI)’와 ‘소비 후 순환지수’를 사용한 CI를 설정했다. Brown²⁸⁾은 순환 능력을 측정하기 위해 단위 엔트로피의 사용을 제안했다.

동시에 지역 폐기물 관리 시스템 구축 목표가 폐기물 처리의 경제·환경적 편익을 극대화하는 것이기 때문에 입출력 분석 방법들이 폐기물 측정 분석에 널리 사용되어 왔다. Leontief는 1970년에 환경 입력-출력 오염 감소 모델(environmental input-output pollution reduction model)을 제안하여²⁹⁾³⁰⁾ 폐기물 감소 활동과 전통적인 제품 생산 부서와 폐기물 처리 부서 간의 관계를 정량적으로 분석했다. 그 후로도 많은 학자들이 다양한 연구 요구들에 따라 환경 입출력표의 구조를 개선해왔다. Hubacek와 Giljum³¹⁾은 물리적 입출력 도표(이하 PIOT, physical input-output table)의 재료 사용 부분에 폐기물 배출물을 추가하는 방법을 제안했다. Suh³²⁾도 PIOT에 폐기물 항목을 추가할 것을 제안했지만 그는 재료 공

-
- 14) Joosten, L.A.J.; Hekkert, M.P.; Worrell, E. Assessment of the plastic flows in The Netherlands using STREAMS. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000, 30, 135-161.
 - 15) Melo, M.T. Statistical analysis of metal scrap generation: The case of aluminum in Germany. *Resour. Conserv. Recycl.* 1999, 26, 91-113.
 - 16) Van Beers, D.; Graedel, T.E. The magnitude and spatial distribution of in-use copper stocks in Cape Town, South Africa: Research article. *S. Afr. J. Sci.* 2003, 99, 61-69.
 - 17) Zhang, J. Studying on Zinc Cycle and Regeneration Index of Depreciated Zinc Products in China. Ph.D. Thesis, Northeastern University, Boston, MA, USA, 2007.
 - 18) Byström, S.; Lönnstedt, L. Waste paper usage and fiber flow in Western Europe. *Resour. Conserv. Recycl.* 1995, 15, 111-121.
 - 19) Joosten, L.A.J.; Hekkert, M.P.; Worrell, E.; Worrell, E.; Turkenburg, W. STREAMS: A new method for analyzing material flows through society. *Resour. Conserv. Recycl.* 1999, 27, 249-266.
 - 20) Hekkert, M.P.; Joosten, L.A.J.; Worrell, E. Analysis of the paper and wood flow in The Netherlands. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000, 30, 29-48.
 - 21) Patel, M.K.; Jochem, E.; Radgen, P.; Worrell, E. Plastics streams in Germany—An analysis of production, consumption and waste generation. *Resour. Conserv. Recycl.* 1998, 24, 191-215.
 - 22) Peralta, G.L.; Fontanos, P.M. E-waste issues and measures in the Philippines. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2006, 8, 34-39.
 - 23) Lu, Z.; Yue, Q. Two Methods and Applications of Substance Flow Analysis. *Resour. Recycl.* 2006, 2, 27-28.
 - 24) Hage, O.; Söderholm, P. An econometric analysis of regional differences in household waste collection: The case of plastic packaging waste in Sweden. *Waste Manag.* 2008, 28, 1720-1731.
 - 25) Berglund, C.; Söderholm, P. Complementing Empirical Evidence on Global Recycling and Trade of Waste Paper. *World Dev.* 2003, 31, 743-754.
 - 26) Byström, S.; Lönnstedt, L. Paper recycling: A discussion of methodological approaches. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000, 28, 55-65.
 - 27) Yamashita, H.; Kishino, H.; Hanyu, K.; Hayashi, C.; Abe, K. Circulation indices: New tools for analyzing the structure of material cascades. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000, 28, 85-104.
 - 28) Brown, M.T.; Buranakarn, V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resour. Conserv. Recycl.* 2003, 38, 1-22.
 - 29) Leontief, W. Environmental repercussions and the economic structure: An input output approach. *Rev. Econ. Stat.* 1970, 52, 262-271.
 - 30) Leontief, W.; Ford, D. Air pollution and the economic structure: Empirical results of input-output computations. In *Input-Output Techniques: Proceedings of the Fifth International Conference on Input-Output Techniques*, Geneva, Switzerland, January 1971; Bródy, A., Cater, A.P., Eds.; North-Holland Publ. Co: Amsterdam, The Netherlands, 1972; pp. 9-30.
 - 31) Hubacek, K.; Giljum, S. Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecol. Econ.* 2003, 44, 137-151.

급 부분에서 폐기물을 부정적인 투입 항목으로 사용했다. Hoekstra³³⁾는 ‘기본적인 PIOT’, ‘확장된 PIOT’ 및 ‘완전한 PIOT’를 비교하여 보완된 ‘완전한 PIOT’를 제안했다. 혼합 입-출력 도표들에 기초한 환경 입-출력 분석 분야에서 Leontief는 환경 입-출력 오염 감소 모델의 세 가지 가정들과 실제 상황 사이의 불일치를 지적했다(예를 들어 매립은 모든 고형 폐기물들에 채택될 수 있는 처리방법이고 주방 폐기물은 소각, 바이오 가스 생산, 매립 등 다양한 방법으로 처리될 수 있다.) 나카무라³⁴⁾는 폐기물 수명 주기의 관리 문제를 해결하기 위해 폐기물 입출력(WIO, waste input-output) 모델을 제안했다.

하지만 위 연구들의 대부분은 특정 기업이나 단지에서 폐지와 고철과 같은 단일 폐기물의 흐름과 신진대사에 중점을 두었고 도시-지역 수준의 지역 산업공생 시스템에서 폐기물 흐름에 대한 정제된 정량적 연구가 부족했다³⁵⁾. 따라서 이 연구에서는 재료 대사와 산업 생태학의 이론적 틀 속에서 중국 순환 경제 개발 모델을 위한 국가 발전 및 개혁 위원회(National Development and Reform Commission of China's regional circular economy development model)가 선정한 대표적 사례인 ‘진창 모델’이 연구 대상으로 활용되었다. Wang³⁶⁾이 제안한 요소 흐름(element flow)을 기반으로 폐기물 흐름 분석(WFA, waste flow analysis)과 폐기물 대사 입-출력 분석(WMIOA, waste metabolism input-output analysis)을 결합하여 산업공생 시스템 폐기물 흐름 대사 분석(ISSWFMA, industrial symbiosis system waste flow metabolism analysis)을 구성했다. 또한 2005년부터 2019년까지 진창 산업공생 시스템의 폐기물 흐름과 대사 과정을 정확하게 특성화하기 위해 CI를 활용하여 도시-지역 수준으로 폐기물 흐름 연구 방법을 확대하고 산업 생태계의 정제된 관리에 대한 정부 및 기업의 의사 결정 기반을 제공하였다.

2. 연구 사례들

진창(金昌)시는 동경 101°04′35″~ 102°43′40″, 북위 37°47′10″~39°00′30″에 위치한다. 이 도시는 중국의 서북부에 있는 전형적인 광물자원 도시이다. 이 도시는 발견된 광물 매장지들이 50여종에 달한다. 그 중에서 니켈, 코발트 및 백금계 귀금속 생산량이 전국 총량의 90% 이상을 차지하고 있어 “중국의 니켈 수도”로 잘 알려져 있다. 진창시는 중국 최대의 니켈 및 코발트 생산 기지이고 백금계 귀금속들의 제련 중심지이자 자원 종합 활용을 위한 중국 내 3대 주요 기지들 중 하나이다. 1978년부터 진창시는 광물 자원들의 종합 활용 문제를 해결하기 위해 터미널 관리에 주력해 왔다. 진창은 1990년부터 2005년까지 비철금속 심층가공 산업 발전을 특별히 강조하였고 아황산가스의 자원화 문제를 해결하는데 주력하였으며, 황화물 기반 자원들이 지배적인 화학 산업의 발전을 촉진하여 산업공생 체제를 초기에 형성하였다. 2006년부터 간쑤성의 제1차 순환경제 발전계획인 ‘진창시 순환경제 발전계획(2006~2020년)’이 수립·시행되어 왔다. 순환경제는 순환 산업, 순환 농업, 순환 사회의 세 가지 체계들로부터 발전되었다. 기업들을 중심이 되고 단지들이 매개자들(carriers)이 되는 시범 운영이 이루어졌다. 니켈과 코발트와 같은 주력 산업들을 기반으로 자원 재활용 산업 시스템 구축을 통해 “구리 니켈 황화물의 채굴-황삭(roughing)-정제-니켈 구리 코발트 압연 및 신소재”, “배기 가스 제련-이산화황-황산-황화물 산업”, “가성 소다-염소-PVC-칼슘 카바이드 슬래그-시멘트”와 같은 에너지 화학 공업, 황화물 산업, 염소-알칼리 화학 공업, 석탄 화학 공업 등이 지배적인 산업 생태 사슬(industrial ecological chain)이 형성되었다. 이것은 기업체에서 산업 수준과 지역 수준으로 순환경제의 발전을 촉진시켜왔고 단일 자원에 의존하는 개발에서 점차적으로 다원적 도시 산업공생 시스템으로 전환되어 왔다. 이러한 변환은 “진창

32) Suh, S. A note on the calculus for physical input-output analysis and its application to land appropriation of international trade activities. Ecol. Econ. 2004, 48, 9-17.

33) Hoekstra, R.; van den Bergh, J.C.J.M. Constructing physical input-output tables for environmental modeling and accounting: Framework and illustrations. Ecol. Econ. 2006, 59, 375-393.

34) Nakamura, S. The Waste Input-Output Approach to Materials Flow Analysis. J. Ind. Ecol. 2007, 11, 50-63.

35) Lu, C. Study on System Evolution and Symbiosis Effects of Industrial Symbiosis-Case of Jinchang. Ph.D. Thesis, Lanzhou University, Lanzhou, China, 2013

36) Wang, T.; Daniel, B.M.; Graedel, T.E. Forging the anthropogenic iron cycle. Environ. Technol. Sci. 2007, 41, 5120-5129.

모델"로 불린다(그림 1). 2008년에 국가 발전 및 개혁 위원회(National Development and Reform Commission)는 진창을 국가 신소재 및 첨단 산업 기지로 지정하였다. 2010년, 산업 정보 기술부(Ministry of Industry and Information Technology)는 진창을 신산업화 산업들의 국가 시범 기지로 지정하였다. 특히 2011년에는 국가 발전 개혁 위원회(NDRC, National Development and Reform Commission)에서 지역 순환경제의 대표 사례 60건들 중 하나로 선정되어 전국적으로 홍보되었다.

그림 설명: 각종 산업체간 가스, 물, 플라이 애쉬, 각종 슬래그 등을 주고 받는 관계도로 묘사됨.

그림 1. 진창의 산업공생 시스템

그림 1은 녹색, 파란색 및 검은색 선들은 각각 폐수, 배기 가스 및 고형 폐기물의 재활용 과정을 보여 준다. 폐열 자원들을 완전히 회수하여 증기를 생산하고 난방 시스템은 열과 전력을 동시에 발생시킨다. SO₂는 고체 황, 액체 아황산가스, 황산나트륨, 그리고 다른 황산 생성물을 생산하는데 사용되었다. 폐수 재활용 시스템들과 지하 광산 폐수 재사용 시스템들을 사용하고 2단계 폐수 처리장들을 건설하면서 공장 내 광물 처리수 재활용이 강화되었다. 광산 폐수는 광산, 식물 녹화 및 생산을 위해 사용되었으며 정제 폐수는 귀금속들을 재활용하기 위해 처리되었다. 광미(광물찌꺼기) 충전 시험(tailings filling test)을 통해 선처리된(beneficiation) 광물 찌꺼기들은 지하 채움 재료로 사용되었다. 광미와 농업용 덮개 폐기물(waste agricultural mulch)은 합성 텀플릿들, 웰커버(well covers)들, 웰링(well rings)들을 만드는데 사용되어 강철 텀플릿 및 주철로된 웰커버(well covers)들을 대체하였다. 건식 및 습식 플라이 애쉬 생산, 저장, 활용을 위한 지원 시설들이 구축되었고 플라이 애쉬는 지하 채움용 시멘트의 일부를 대체하는 데 사용되었다. 또한 슬래그 생산을 통한 지하 채움용 칸막이 벽들의 생산 라인이 구축되어, 신더(cinder: 부분적으로 연소 된 석탄이나 나무의 작은 조각) 벽돌로 지어진 매립용 칸막이 벽들이 원래의 목재 칸막이 벽들을 대체하기 위해 사용되어 플라이 애쉬와 보일러 슬래그의 종합적 활용이 촉진되었다.

3. 자료 및 방법

3.1 방법론: 생산 행렬

생산행렬(production matrix)은 시스템에서 주어진 시간(즉, 순간적 흐름들) 동안 보존된 흐름들의 정량적 표현이다³⁷⁾. 물리적 시스템이 주어지면 생산행렬은 흐름 분석을 사용하여 수학적으로 해부(dissected)되는 물리적 시스템의 관찰내용들을 보여준다. 가장 일반적인 형태에서 P는 표 1에서 보이는 것처럼 $5n \times 5n$ 의 정방형 행렬이다.

표 1. 생산 행렬 P

		from																				
		Z_{10}	Z_{20}	$\dots$	Z_{n0}	$-x_{1-}$	$-x_{2-}$	$\dots$	$-x_{n-}$	H_1	H_2	$\dots$	H_n	y_{01}	y_{02}	$\dots$	y_{0n}	X_{1+}	X_{2+}	$\dots$	X_{n+}	
to	Z_{10}																					
	Z_{20}																					
	$\dots$																					
	Z_{n0}				0						0						0					
	$-x_{1-}$																					
	$-x_{2-}$																					
	$\dots$																					
	$-x_{n-}$																					
	H_1	Z_{10}	0	0	0	$-x_{1-}$	0	0	0	f_{11}	f_{12}	$\dots$	f_{1n}									
	H_2	0	Z_{20}	0	0	0	$-x_{2-}$	0	0	f_{21}	f_{22}	$\dots$	f_{2n}					0				
	$\dots$			$\dots$		0	0	$\dots$	0	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$									
	H_n	0	0	0	Z_{n0}	0	0	$\dots$	0	$-x_{n-}$	f_{1n}	f_{2n}	$\dots$	f_{nn}								
	y_{01}										y_{01}	0	0	0								
	y_{02}										0	y_{02}	0	0								
	$\dots$										0	0	$\dots$	0								
y_{0n}				0						0	0	0	y_{0n}				0					
X_{1+}										X_{1+}	0	0	0									
X_{2+}										0	X_{2+}	0	0									
$\dots$										0	0	$\dots$	0									
X_{n+}										0	0	0	X_{n+}									

여기서 n은 공정들의 개수이다(공정들은 H_k로 표시됨). P의 요소 p_{ij}는 열 j와 관련된 요소로부터 행 i

37) Bailey, R.; Allen, J.K.; Bras, B. Applying Ecological Input-Output Flow Analysis to Material Flows in Industrial Systems: Part I: Tracing Flows. J. Ind. Ecol. 2008, 8, 45-68.

와 관련된 요소로 흐르는 흐름이다. 그런 다음 P는 식 (1)과 같이 여러 하위 행렬들로 나뉜다.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 \\ 0 & P_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

표 1에서 사용된 기호법(notation)는 다음과 같다.:

H_k = 공정 k, $k=1, \dots, n$; 그래픽 모형에서 노드로 간주됨.

z_{i0} = 시스템 외부로부터 공정 i로의 유입 (시간당 질량 또는 에너지)

y_{0j} = 공정 j로부터 시스템 외부로의 유출 (시간당 질량 또는 에너지)

f_{ij} = 공정 j로부터 공정 i로의 흐름 (시간당 질량 또는 에너지)

x_k = 공정 k의 상태의 시간 미분(time derivative)

여기서

$$x_{k-} = \begin{cases} x_k, & x_k < 0 \\ 0, & x_k \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{k+} = \begin{cases} x_k, & x_k > 0 \\ 0, & x_k \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

양의 상태 미분값들(Positive state derivatives)인 x_{k+} 는 축척값들의 크기의 증가를 나타내고 음의 상태 미분값들인 x_{k-} 는 감소를 나타낸다. 이러한 상태 미분값들은 모든 x_{k-} 가 (재고 크기(stock size)를 줄여서 공정에서 흐름을 증가시키는) 유입으로 모델링되는 반면에 모든 x_{k+} 는 (흐름을 저장으로 전환하여 공정에서 흐름을 감소시키는) 유출로 모델링되는 방식으로 표현된다. 음과 양의 상태 미분값들의 모델링은 유입과 유출의 통과흐름(throughflow)에 대한 공식들에서 명백하게 나타난다. H_k 의 T_k 는 "공정 k를 통한 에너지 또는 재료의 흐름의 비율"로 정의된다³⁸⁾. 식 (4)와 (5)에서와 같이 통과흐름은 P_{21} 과 P_{22} 의 각 행의 합계 또는 P_{22} 와 P_{32} 의 각 열의 합계로 수학적으로 정의된다.

$$T_k = \sum_{j=1}^n f_{kj} + z_{k0} - x_{k-}, \quad k = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} + y_{0k} + x_{k+}, \quad k = 1, \dots, n \quad (5)$$

식(4)는 어떤 공정으로 들어오는 모든 유입량의 총합을 산출하는 반면에 (시스템 외부로부터의 다른 공정들로부터 재고 크기 감소에 따른 유입들), 식(5)는 어떤 공정으로부터 유출되는 모든 유출량의 총합을 산출한다. 질량 보존 법칙에 따라 두 표현들은 동일해야 한다. T_k 와 P는 투입-생산 흐름 분석에서 모델링된 흐름들의 물리적 시스템의 추상 개념을 나타낸다. 즉, 투입-생산에 대한 수학적 적용되는 물리적 시스템의 관측치들이다. P를 정의한 후, 투입과 생산의 수학적 분석을 작업에 도입할 수 있다. 두 분야들 간의 재료 흐름, 즉 f_{ij} 를 분석할 필요가 있다. 그 후 q_{ij}^* 를 도입해서 섹터 i의 플럭스 T_i 에서 f_{ij} 의 비율을 보여준다.

38) Finn, J.T. Flow Analysis: A Method for Tracing Flows through Ecosystem Models. Ph.D. Thesis, University of Georgia, Athens, GA, USA, 1977.

$$f_{ij} = q_{ij}^* \times T_i \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)로 대체하면 T_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_k = \sum_{i=1}^n q_{ij}^* T_i + y_{0k} + x_{k+} \quad (7)$$

식 (7)에서 식의 우변(右邊) 첫 번째 부분은 H_j 부서에서 시스템의 다른 분야들로 유입되는 총 흐름을 나타내기 위해 사용된다. 선형 변환 후 식(7)을 식(8)의 행렬로 변환할 수 있다. 식에서 Q_{22}^* 는 q_{ij}^* 의 행렬 형태로 순간 유입 행렬 Q^* 의 $n \times n$ 하위 행렬 역할을 한다.

$$T' = T' Q_{22}^* + y' + x'_+ \quad (8)$$

식 (8)에서 y' 과 x'_+ 는 대각행렬이며, Q^* 의 요소 Q_{ij}^* 는 H_i 의 유량(flux) T_i 에 대한 생산 행렬 P 의 각 요소인 p_{ij} 의 비율이다. Q^* 의 구조는 다음과 같다.:

$$Q^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ Q_{21}^* & Q_{22}^* & 0 \\ 0 & Q_{32}^* & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

항을 이동하여 식 (8)을 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$T' (E - Q_{22}^*) = y' + x'_+ \quad (10)$$

식 (10)의 양변(兩邊)에 $(E - Q_{22}^*)^{-1}$ 을 곱하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.:

$$T' = (y' + x'_+) (E - Q_{22}^*)^{-1} = (y' + x'_+) N_{22}^* \quad (11)$$

따라서 N_{22}^* 는 다음과 같이 정의할 수 있다.:

$$N_{22}^* = (E - Q_{22}^*)^{-1} \quad (12)$$

유사하게 N_{22}^* 는 N^* 의 블록 하위 행렬로도 존재한다. N^* 의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$N^* = (E - Q^*)^{-1} = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ N_{21}^* & N_{22}^* & 0 \\ N_{31}^* & N_{32}^* & E \end{bmatrix} \quad (13)$$

Hannon³⁹⁾는 N^* 행렬을 생태계의 "구조"라고 불렀는데, 이는 전체 시스템을 구성하는 다양한 섹터들 사이의 직·간접적인 흐름을 나타내기 때문이다. Pattern 외⁴⁰⁾는 N^* 을 모든 직접 및 간접 종속 경로들이 포함된 폐쇄 전이 행렬(closure transitive matrix)로 간주했다. Szyrmer와 Ulanowicz⁴¹⁾는 다음 식과 같이 N^* 에 대한 추가 설명을 제공하였다.

39) Finn, J.T. Flow Analysis: A Method for Tracing Flows through Ecosystem Models. Ph.D. Thesis, University of Georgia, Athens, GA, USA, 1977

40) Patten, C.; Bosserman, R.; Finn, J.; Cale, W. Propagation of Cause in Ecosystems: Academic Press: New York, NY, USA, 1976.

41) Szyrmer, J.; Ulanowicz, R.E. Total flows in ecosystems. Ecol. Model. 1987, 35, 123–136.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^1 (Q^*)^k = E + Q^* + (Q^*)^2 + \dots + (Q^*)^k + \dots = (E - Q^*)^{-1} \quad (14)$$

여기서 항등 행렬(identity matrix) E는 시스템의 모든 초기 흐름을 나타내고, Q^* 는 시스템 내의 하위 전체(sub-whole, 역자주: Koestler (1968)에 의해 만들어진 개념으로 부분들과 전체 사이의 어떤 수준으로 정의됨)들 간의 제1 수준의 직접 흐름을 나타내고 $(Q^*)^k$ 는 시스템의 k번째 수준의 흐름 경로를 나타내며, 행렬 N^* 은 시스템의 모든 직접 및 간접적 흐름들을 의미한다.

N^* 을 정의한 후에는 시스템 내에 물질들의 재활용 효율성을 보다 직관적으로 반영하기 위해 입출력 지수를 분석에 도입한다. 분야별 유량 T_k 는 이전 절들에서 정의되었으며 여기서는 전체 시스템 통과 흐름(Total System Through Flow, 이하 TST)을 나타내며 매번 각 분야에 흐르는 재료의 양을 산출한다.

$$TST = j'T = \sum_{k=1}^n T_k \quad (15)$$

경로 길이는 흐름별로 거치는 공정들의 수를 나타낸다. 각각의 유입 z_{ko} 은 개별 경로 길이(ZPL_k)를 갖고 있는데, 이는 시스템을 떠나기 전에 z_{ko} 를 통해 들어가는 재료가 거치는 평균 공정 수를 나타낸다. 유사하게 각 유출 y_{ok} 는 개별 경로 길이(YPL_k)를 갖고 있는데, 이는 y_{ok} 를 통해 떠나기 전에 재료가 거치는 평균 공정 수를 나타낸다. 이러한 각 측정치는 유입 및 유출 전환 폐쇄 행렬들인 ZPL_k과 YPL_k의 중심 하위 행렬을 사용하여 산출된다.

$$ZPL = j'N_{22}^* \quad (16)$$

$$YPL = N_{22}^* j \quad (17)$$

전체 시스템 PL의 평균 경로 길이는 유입이나 유출의 상대적 크기에 의해 각각 가중치가 부여된 유입 또는 유출 PL들의 합이다. 그러나 PL에 대한 더욱 간단한 수학적 표현은 식 (18)에 나타난 것처럼 단순히 TST를 유입의 합으로 나눈 것이다.

$$PL = \frac{TST}{\sum IN} \quad (18)$$

$$\text{여기서} \quad \sum IN = \sum_{i=1}^n Z_{i0} - \sum_{i=1}^n x_{i-} = \sum OUT = \sum_{j=1}^n y_{0j} + \sum_{j=1}^n x_{i+} \quad (19)$$

재료 피드백 루프들과 고도로 상호 연결된 시스템은 어떠한 재료 피드백도 없는 유사 시스템보다 높은 PL을 가질 것이다. 주어진 공정들의 수를 포함하는 시스템의 경우에 가능한 최단 PL은 선형 흐름, 즉 피드백 없이 한 공정에서 다음 공정으로 진행되는 흐름으로 얻어진다. 그렇게 되면 PL은 흐름 순환의 간접적 측정값이 되지만 직접적으로 순환을 직접 측정하지는 않는다. 이를 위해 두 개의 다른 측정값들이 개발되었다. 앞의 인용을 바탕으로 RE_k 는 다음과 같이 전이적 폐쇄 행렬 요소들의 함수로 공식화될 수 있다.:

$$RE_k = \frac{n_{kk}^* - 1}{n_{kk}^*} \quad (20)$$

게다가 시스템에서 순환된 흐름의 양은 다음과 같이 정의될 수 있다.:

$$TST_c = \sum_{k=1}^n RE_k T_k \quad (21)$$

W

흐름 시스템의 순환 지수(CI)는 순환된 TST(TST_c)의 백분율로 정의된다.

$$CI = \frac{TST_c}{TST} = \frac{\sum_{k=1}^n RE_k T_k}{TST} \quad (22)$$

CI 산출로 시스템 내 재료 흐름과 활용을 직접 파악할 수 있어서 시스템 내 여러 분야들 간의 상호관계도 파악할 수 있다

3.2. 모델: ISSWFMA

산업공생의 핵심이자 본질은 어떤 기업의 폐기물을 다른 기업의 원료로 사용하는 것이다. Wang 등이 제안한 요소 흐름에 기초하면⁴²⁾ WFA와 WMIOA를 결합하여 ISSWFMA 모델을 수립하였고(그림 2) 생산 행렬이 진창 산업공생 시스템에서 폐기물의 흐름과 재활용을 명확화하기 위해 사용되었다. 그들 중에서 시스템 경계(system boundary)는 산업공생 시스템의 폐자원들의 생성과 활용을 수반하는 산업 경계를 말하며, 그 기간은 1년이었다.

자원의 유입과 유출 과정에서 폐기물의 발생부문(H₁)과 폐기물 활용 부문(H₂)에서 폐기물의 재활용, 폐기, 감소, 손실 과정의 흐름을 나타내는 도식이 묘사됨.

그림 2. 산업공생 시스템 폐기물 흐름 대사 분석 모델.

공생 시스템은 폐기물 발생 부문(H₁)과 폐기물 활용 부문(H₂)의 두 부문들로 단순화된다. 엄밀히 말하면 폐기물은 시스템의 어느 분야에서나 발생될 수 있다. 이 연구에서는 폐기물 발생 분야는 주로 재사용 가능한 폐자원들을 생산하는 분야를 의미하고 재사용 분야는 폐자원들을 추가 처리·활용하는 분야를 의미한다. 이 분석에서는 데이터 부족으로 이산화탄소 배출 가스 생성은 고려하지 않는다.

f 는 시스템 내 폐기물의 흐름을 나타낸다. 그 중에서 f_{21} 은 H₁에서 H₂로 흐르는 폐기물, 즉 재가공된 주요 폐기물의 흐름을 의미한다. f_{12} 는 처리 후에 H₂에서 H₁까지 다양한 형태로 흐르는 폐기물의 양을 말하며, f_{11} 은 폐기물 발생부서에서 폐조각(waste scraps) 등의 재가공과 같은 재활용을 말한다.

x_{1+} 와 x_{2+} 는 각각 H₁과 H₂의 재고들, 즉 당해 연도에 생산되었으나 가공되거나 소비되지 않은 양을 나타낸다. x_{1+} 는 내부적으로 소비 되지만 활용 분야로 이전되지 않는 양을 추가로 나타낼 수도 있다. x_{2+} 는 H₂의 재고 감소(inventory reduction)를 의미한다. 폐기물 처리 능력이 증가할 경우에 활용 분야는 전년도 재고를 소비하여 재고 감소로 이어질 것이다.

y_{01} 은 H₁의 이전(transfer)과 폐기물 활용 공정에서의 손실을 나타내고, y_{02} 는 폐기물 재사용으로 인한 H₂의 생산량을 나타낸다. H₂의 손실들은 f_{12} 를 통해 H₁으로 흘러가고 y_{01} 에 암묵적으로 포함된다고 가정한다. 외부에서 H₁으로 들어오는 파트 z_{10} 은 (주제품을 생산하기 위한 외부 투입들을 제외한) 비효율적인 생산을 위한 투입들과 폐기물 생성과 관련된 기타 투입들을 포함하여 자원 투입(resource input)이라고 불린다. 활용 부문 H₂로 들어가는 파트 z_{20} 은 보충 투입(supplementary input)이라고 하는데, 주로 폐자원들을 이용한 재생산 과정에서 외부에서 유입된 보충 자원들을 포함한다.

3.3. 데이터 원천들

연구 데이터는 주로 "2006-2020년 진창 통계 연감"과 "중국 도시 통계 연감"에서 얻었고 현장 조사 데이터는 진창시의 야금(冶金), 비철, 화학 산업체들로부터 얻었다.

4. 결과

위의 방법과 모델을 이용하여 진창 산업공생 시스템의 고형 폐기물, 폐수, 배기 가스를 포함한 3개의

42) Wang, T.; Daniel, B.M.; Graedel, T.E. Forging the anthropogenic iron cycle. Environ. Technol. Sci. 2007, 41, 5120-5129.

폐기 흐름들을 4단계, 즉 2005년, 2010년, 2015년, 2019년의 데이터를 가지고 분석 하였다. 또한 CI를 계산하여 시스템 내 3대 폐기물들의 흐름과 대사(metabolism)를 정확하고 정량적으로 특성화하였다. 그 결과들은 다음과 같다.

4.1. 고품 폐기물 대사

4.1.1. 고품 폐기물의 발생원과 흐름 분석

고형 폐기물 발생 분야(H_1)는 주로 광산, 제련소, 화학공장, 발전소 등을 의미하고, 활용 분야(H_2)는 고품 폐기물을 자원으로 사용하는 기업들을 말한다. 진창시 산업공생 체계의 고품폐기물 발생원은 주로 채굴된 광미, 세척된 폐기물 잔여물, 탄화칼슘 슬래그, 플라이애쉬 등을 포함하는데 이 중 광미 채굴이 최다량을 차지한다. 활용 분야(H_2)로 유입되는 폐기물은 주로 광미, 제련 슬래그, 플라이애쉬 등을 포함한다. 광미의 2차 처리 후, 응집물은 제련에 사용되고, 나머지는 매립에 사용된다. 세척 고품 폐기물에서 사용 가능한 자원들이 재개발된 후, 그 제품들은 시스템 외부에서 전용(轉用)되고, 나머지 고품 폐기물은 광산 매립에 사용된다. 한편, 플라이애쉬와 다른 제품들은 건축 자재들을 생산하는데 직접적으로 사용된다. 표 2에서 2005, 2010, 2015년에는 y_{02} 와 f_{21} 이 계속 증가하고 있고 x_{2+} 는 점차 감소하여 H_1 에서 H_2 로의 유입량 증가하며 H_2 의 처리 능력 향상되고 H_2 가 비축물들의 사용을 시작하기도 한다. y_{02} 도 폐기물을 처리하고 외부로 제품들을 공급하는 H_2 의 능력이 지속적으로 증가하고 있음을 보여준다. 2015년에는 외부 투입은 감소하기 시작하고 내부 흐름의 양은 갑자기 증가한다. 2019년에 2015년에 비해 외부 투입량이 증가하여 내부 흐름량이 감소하지만, 전체 시스템 상으로는 외부 투입과 내부 흐름량이 증가하여 2015년과 2019년에는 진창의 폐기물 활용 외부 의존도가 낮아지고, 고품 폐기물의 재활용 능력이 더 높은 수준에 도달했다. 기술 진보에 따라 폐기물 발생분야는 자체 폐기물에 대한 처리 능력이 높아져 f_{11} 이 지속적으로 증가하고 있고 f_{01} 은 감소 추세를 보인다.

표 2. 진창시 산업공생 시스템의 고품 폐기물 생산과 활용.

	외부 투입		내부 생산		내부 흐름			내부 재고		
	z_{10}	z_{20}	y_{01}	y_{02}	f_{21}	f_{12}	f_{11}	x_{1+}	x_{2+}	x_{2-}
2005	945.51	98.81	3.92	157.40	421.05	119.46	2.51	640.00	243.00	0.00
2010	581.13	38.99	0.37	295.05	954.56	623.80	9.24	250.00	106.00	-31.30
2015	533.65	18.12	0.33	373.14	1124.49	811.17	25.03	220.00	47.00	-88.70
2019	574.20	15.94	0.29	463.65	1267.52	873.61	37.06	180.00	42.00	-95.80

단위: 10,000톤

4.1.2. 고품 폐기물 순환 흐름도

그림 3에서 2005년 진창시의 산업공생 시스템은 초기 단계에 있으며, 고품 폐기물 자원들의 흐름은 단일 형태였고, 활용 분야의 생산 능력이 불충분하고 광미의 처리 능력이 부족하였다. 전체 공생 시스템의 관점에서 보면 H_1 에서 H_2 로 유입되는 폐기물의 양은 421만500톤 이고 H_2 에서 돌아오는 양은 199만 4천톤이다. 유입 흐름과 반환 흐름들이 모두 매우 적고 H_2 부문의 재고량은 243만톤으로 크다. 전체 시스템도 더 많은 외부 투입이 필요하다(그림 3). 2010년에는 고품 폐기물 자원들의 흐름을 최적화하고 활용 분야의 생산량도 향상된다. 고품 폐기물들이 가장 많은 광미의 처리 능력은 여전히 불충분하다. 2005년에 비해 H_2 부문의 생산 y_{02} 는 87.5 % 증가했고 외부 투입 z_{20} 은 60.5 % 감소했으며 재고 x_{2+} 는 137만 톤 감소하여 시스템 내 고품 폐기물 자원 재사용 능력이 높아지고 있는 것으로 나타났다. 2015년에는 하루 15,000톤의 광미 재처리와 40만톤의 토양 개량과 같은 순환경제 프로젝트의 착수로 폐기물 재활용 능력이 크게 증가하고 재고가 지속적으로 감소한다. 생산 부문 H_1 의 경우에 광미들의 처리가 크게 향상되고 H_1 재고가 더 잘 활용된다. 2005년에 비해 2019년에는 고품 폐기물 재활용 능력이 획기적으로 향상되고 재고가 460만톤 감소하여 전체 광미 처리 능력이 향상되고 있음을 보여준다. 2005년, 2010년, 2015년과 비교하면 2019년에는 H_1 에서 H_2 로 유입되는 고품 폐기물의 양이 크게 늘어난다. H_1

부문의 경우에 폐기물 잔류량이 줄고, 재활용량도 늘어나 H_1 의 폐기물 처리 능력과 재활용 수준이 크게 향상된 것으로 나타났다.

4개년도의 고�형 폐기물의 순환 흐름과 양을 다이어그램과 수치로 표현한 도식으로 묘사됨.

그림 3. 2005년, 2010년, 2015년, 2019년 진창 산업공생 시스템의 고�형 폐기물 순환 흐름도

4.2. 폐수 대사

4.2.1. 폐수원과 흐름의 분석

폐수원들은 일반 산업용 폐수, 제련수, 광산용수 등을 포함한다. 활용 부서는 주로 하수 처리 플랜트 들을 말한다. 공생 시스템에서 오수가 생성된 후에 직접 하수 처리 플랜트로 유입된다. 처리된 폐수는 주로 광물 처리, 광미 처리, 염수(鹽水) 추출 및 농업용수의 형태로 재활용 및 재사용된다. 시스템의 외부 생산은 주로 중염수에서 염화나트륨을 추출하는 것이다. H_1 부서의 자가 순환 부분은 주로 되메우기를 위한 광산 용수로부터 나온다.

표 3의 결과들에 따르면 2005년부터 2019년까지 진창시의 산업공생 시스템에서 폐수 자원 투입, 재사용 제품 산출(產出), 내부 흐름, 내부 재고가 증가하는 추세를 보여 진창시의 산업, 제련, 채광(採鑛) 부문의 외부 자원들에 대한 의존도가 증가한 것으로 나타나며 폐수 처리 능력의 부족은 폐수 저장량의 증가로 나타났다. 하지만 산업, 제련, 채광과 하수 처리 플랜트들과 같은 생산 부서들의 폐수 재활용 능력은 지속적으로 개선되고 있으며 제품 산출도 증가하고 있다.

표 3. 진창시 산업공생 시스템으로부터의 폐수 생산과 활용.

	외부 투입		내부 생산		내부 흐름			내부 재고		
	z_{10}	z_{20}	y_{01}	y_{02}	f_{21}	f_{12}	f_{11}	x_{1+}	x_{2+}	x_{2-}
2005	2840	0.00	0.00	6	5322	3662	903	1170	1664	0.00
2010	4407	0.00	0.00	27	8136	6024	1728	2295	2085	0.00
2015	5231	0.00	0.00	98	9442	6791	2424	2580	2523	0.00
2019	6280	0.00	0.00	122	10,840	7709	3389	3149	3009	0.00

4.2.2. 폐수 순환 흐름도

그림 4에서 2005년 진창시의 산업공생 시스템은 이미 비교적 완전한 하수 처리 시스템을 갖추고 있어서 기본적으로 하수 배출 제로화를 달성할 수 있다. 하지만 생산 규모와 폐수 처리 능력의 한계로 처리량과 유량이 적다. 2010년 진창시의 산업공생 시스템은 기본적으로 완성됐다. 생산량 증가로 폐수처리 흐름이 증가하는데, 이는 H_1 의 유입량의 2,362만 톤과 H_2 의 회수량 2,814만 톤의 증가 효과가 반영된 것이다. 2005년에 비해 H_1 의 자체 폐기물 재사용 능력은 91.4% 증가한다. 2010년에 비해 2015년 폐수 처리량이 지속적으로 증가하였고 투입 및 교환량도 늘어났다. 자원 투입 z_{10} 은 824만 톤 증가하였고, H_1 에서 H_2 로 흐르는 폐수량은 1306만 톤, H_2 회수량은 767만 톤, H_1 의 자체 폐기물 재사용 능력은 40.3% 증가하였다. 2019년에는 y_{02} 와 f_{21} 이 모두 증가해서 H_1 에서 H_2 로의 흐름량과 H_2 의 처리 능력이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 2019년에는 내부 흐름이 증가하고 있어서 폐수 사용 능력이 지속적으로 향상되고 있는 것으로 나타났다. H_1 과 H_2 분야들의 외부 투입과 재고량이 증가하고 있는데 이는 진창시의 폐수 처리가 여전히 외부 투입에 크게 의존하고 있어 처리 용량의 추가적인 개선이 필요하다는 것을 보여준다.

4개년도의 폐수 순환 흐름과 양을 다이어그램과 수치로 표현한 도식으로 묘사됨.

그림 4. 2005년, 2010년, 2015년, 2019년 진창 산업공생 시스템의 폐수 순환 흐름도

4.3. 배기 가스 대사

4.3.1. 배기 가스원과 흐름의 분석

배기 가스의 원천들은 주로 SO_2 , NO_2 , 탄화칼슘 테일 가스, 그리고 수소, 염소, 아세틸렌, 코크스로 (爐) 가스, 암모니아와 같은 중간 제품 가스들이며, 주로 제련, 열병합발전, 석탄 화학 산업, 기타 산업 공정들로부터 배출된다. 모델에서 H_1 은 주로 배기 가스와 중간 제품 가스를 생산하는 분야를, H_2 는 주로 중간 생성물들과 배기 가스들을 자원으로 사용하는 분야를 말한다. 중간 생성물들의 재사용은 내부 소비로 간주된다. 외부 자원 투입이 시스템에 들어가면 대부분 f_{21} 을 거쳐 활용 분야로 흘러가고 일부 가스(코크스로 가스 등)는 재활용이 가능하며, 코크스로 가스는 H_1 분야의 주요 비축물이다. 미사용 부분은 처리 후 배출되는데 이는 손실(y_{01})이다. 가공 및 활용 분야에는 가스가 활용되는 동안 외부 보충 투입물이 대량으로 투입되어 대부분의 유입 가스는 공생 시스템에서 벗어나 다양한 산물들로 가공된다. 재고 x_{2+} 는 주로 염소의 보유량이다. 즉, 생성된 염소는 완전히 소비되지 못하여 재고로 처리될 수 없다. 활용 단계에서는 H_1 생성에 필요한 중간 산물들을 생산할 수 있다. 중간 산물들은 섹터 H_2 에서 H_1 로 흐르는 탄화 칼슘 테일가스가 지배적이다. 표 4의 결과에 따르면 2005년부터 2019년까지 y_{02} 와 f_{21} 이 모두 증가하고 H_1 에서 H_2 로의 흐름은 6,432,600 톤으로 순증가 하였다. H_2 의 처리 능력이 늘어나고 x_{2+} 는 하향 추세를 갖고 외부 투입량의 변화가 크다. 2005년에 비해 2019년에 자원 투입 z_{10} 은 880만3천백 톤의 순 증가로 배기 가스의 재활용 의존도가 높은 것으로 나타났다. 폐기물 자체 재활용의 경우에 f_{11} 이 계속 증가하여 기술 발전으로 폐기물 생성 분야가 자체 폐기물을 처리할 수 있는 능력이 비교적 높다는 것을 보여준다.

표 4. 진창시 산업공생 시스템의 배기가스 생산과 활용.

	외부 투입		내부 생산		내부 흐름			내부 재고		
	z_{10}	z_{20}	y_{01}	y_{02}	f_{21}	f_{12}	f_{11}	x_{1+}	x_{2+}	x_{2-}
2005	293.56	137.22	25.29	355.49	249.47	31.20	80.00	50.00	0.00	0.00
2010	693.17	57.69	7.98	569.48	629.79	104.60	180.00	160.00	13.40	0.00
2015	954.53	67.80	5.76	691.47	780.67	141.90	260.00	310.00	15.10	0.00
2019	1173.87	77.54	3.58	785.63	892.73	172.44	350.00	450.00	12.20	0.00

단위: 10,000톤

4.3.2. 배기 가스 순환 흐름도

그림 5에서와 같이 2005년에는 진창시 석탄 화학 공업의 배기가스 이용 방식이 처음 수립되어 제련 산업에서 황화수소 및 질소 산화물들의 처리 능력이 증가했다. 그러나 초기 단계라 배기가스 처리 능력이 부족하고, 처리 및 재처리 능력과 공생의 정도가 비교적 취약하기 때문에 가스대사가 선형 생산 모델과 유사하다. 2010년부터는 진창시 산업공생 시스템의 배기가스 활용 방식이 거의 완벽하고, 특히 아황산가스의 회복과 아세틸렌, 탄화칼슘 테일가스, 콜라로가스 등의 대규모 집중 사용이 나타났다. 배기 가스는 시스템에서 질서있게 흐르고 자원으로 효율적으로 사용된다. 자원의 투입과 생산이 급증하고 분야 간 상호 흐름의 양도 2005년 보다 크게 늘었다. 2008년에 비해 2015년 진창시 산업공생 시스템의 배기가스 이용 구조는 큰 변화가 없다. 탄화칼슘 테일 가스와 코크스로 가스의 생산은 계속 증가하고 있다. 하지만 관련된 하류(downstream) 산업체들은 여전히 건설 중이다. 생산량이 적고, 배기가스 사용량이 부족하여 H_1 에 재고가 축적된다. 2010년과 비교하면 자원 투입은 37.7% 급증하였지만 재활용 산출량은 21.4%만 증가하였다. 하류 산업체들의 지원 건설이 동기화되지 않기 때문에 H_2 섹터의 재고도 누적된다. 2019년에는 자원 투입과 재사용 생산이 모두 증가하여 활용 분야들의 재고가 어느 정도 줄어든다. 하지만 탄산칼슘과 코크스로 가스와 관련된 하류 산업들은 여전히 더 개선되어야 하며 이는 H_1 섹터의 재고 증가 추세를 유도한다.

4개년도의 배기가스의 순환 흐름과 양을 다이어그램과 수치로 표현한 도식으로 묘사됨.

그림 5. 2005년, 2010년, 2015년, 2019년 진창 산업공생 시스템의 배기가스 순환 흐름도

4.4. 폐기물 흐름 순환 분석

그림 6은 연구 기간 동안 진창시 산업공생 시스템의 고형 폐기물, 폐수, 배기가스의 CI 지수가 전반적으로 상승 추세를 갖고 있음을 보여준다. 결과는 산업공생 시스템의 공동 생산 체인의 개선으로 다양한 분야들 간의 상호의존관계, 폐기물의 재활용도, 산업공생 능력이 지속적으로 향상되어 산업공생 시스템은 보다 완전한 구조를 갖추게 되었다는 것을 보여준다. 이는 산업공생의 본질적 의미와 일치한다. 일반적인 산업 집단이나 산업 클러스터에 비해 산업공생의 근본적 차이는 상류 기업의 폐기물이 하류 기업의 원료로 사용되어 자원 보존과 환경 보호의 "win-win"을 달성한다는 것이다.

2005년부터 2019년까지 고형 폐기물, 폐수, 배기가스에 대한 순환지수의 변화 추세를 묘사한 도식

그림 6. 진창 산업공생 시스템의 폐기물 흐름 순환지수(CI) 추이

산업공생 시스템의 발전 기초들의 차이와 개발 기간마다 산업공생 시스템의 서로 다른 우선순위로 인해 서로 다른 폐기물 대사에 대해 산업공생 능력이 전반적으로 동일한 경향을 보이지만 다양한 폐기물의 종류별로 서로 다른 발전 단계에 있다. 고형 폐기물 분석에 따르면 시스템의 산업공생 능력은 2005년부터 2010년까지 가장 빠르게 향상되었다. 폐수 분석에 따르면 전체 연구기간 동안 시스템의 산업공생 능력이 서서히 강화된다. 배기가스 분석에 따르면 산업공생 능력은 연구기간 동안 지속적으로 빠르게 증가한다.

5. 결론 및 논의

이 논문은 재료 흐름 분석과 생산 행렬 분석 방법들을 핵심으로 ISSWFMA 모델을 구성하고 진창 모델을 사례로 산업공생 시스템에서 폐기물의 흐름과 재활용 과정들을 정확하고 정량적으로 설명하였다. 결과들로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있다. 이 모델은 도시-지역 수준의 산업공생 시스템의 폐기물 흐름과 폐기물 대사를 보다 잘 설명할 수 있고 폐기물 관리를 지원하기 위한 데이터와 방법을 제공할 수 있다. 연구기간 동안 산업 사슬의 지속적인 개선과 다양한 분야들 간의 지속적인 상호의존관계 강화로 진창시 산업공생 시스템에서 고형 폐기물, 폐수, 배기가스의 CI 지수는 전반적으로 증가 추세를 보였고 재활용도가 지속적으로 증가하고 산업공생 능력이 지속적으로 향상되었으며, 시스템 구조가 더욱 완성되고 있다. 동시에 다양한 폐기물들의 분석을 기반으로 산업공생 능력은 폐기물들의 다양한 유형별로 서로 다른 발전 단계에 있다. 고형 폐기물 기반의 분석에 따르면 2005년부터 2010년까지 산업공생 능력이 가장 빠르게 향상된 것으로 나타났다. 폐수 분석에서 얻은 결론은 전체 연구기간 동안 시스템 내 산업공생 능력이 점차 강화된다는 것이다. 배기가스 분석에 따르면 시스템의 산업공생 능력은 연구기간 동안 계속해서 급증하고 있다.

ISSWFMA 모델은 EW-MFA 방법과 전통적인 투입-생산 방법의 적용 범위와 깊이를 어느 정도까지 확장한다. 그러나 이 모델은 정적 모델이고 국가 및 지역 경제 시스템의 폐기물 대사 과정은 복잡하고 거대한 시스템이며 비선형적이고 역동적인 특성들을 갖고 있다. 폐기물 관련 데이터의 통계와 수집의 어려움과 각종 사회, 경제, 환경적 요인들에 대한 폐기물 대사 패턴들의 정량적 평가와 분석들에 대한 연구가 부족한 점들을 고려하여 이 연구에서 구축한 모델은 시뮬레이션에서 복잡한 시스템을 단순화하려고 시도했다. 하지만 산업공생 시스템을 위한 원료들, 제품들 및 폐기물들을 제공하는 외부 영역 도입과 같은 이러한 시스템들의 복잡한 특성들을 통합하기 위해서는 모델들의 추가 개발이 여전히 필요하다⁴³⁾.

중국의 폐기물 재활용 시스템은 거대한 폐기물 자원들, 낮은 폐기물 재활용율, 그리고 낮은 폐기물 활용 효율의 특성들을 갖고 있다. 이러한 문제들은 재활용 시스템에서 심각한 폐기물 손실을 유도한다. 중국의 폐기물 재활용 시스템의 기술적 구조 측면에서 보면 재활용 쓰레기가 우세한 위치에 있고 그 다음으로 폐기물 매립지, 에너지 회수 및 재사용은 매우 낮은 비율을 차지하고 있다⁴⁴⁾. 하지만, 미래에는 폐기물 감소, 재활용 및 재사용의 큰 잠재성이 있다. 산업화와 세계화의 맥락에서 중국의 지역 고형 폐기물 발생량은 향후 20-25년 동안 계속 증가할 것이다. 하지만 이러한 성장 추세는 높은 환경목표 시나리오 하에서 폐기물 감축 기술의 촉진으로 역전될 수 있다. 산업 구조의 조정과 기술 갱신을 중심으로 한 청정생산과 순환경제 발전 전략들의 시행은 향후 폐기물 재활용 시스템의 물질 대사 모델에 큰 영향을 미칠 것이다⁴⁵⁾.

결론적으로 자원들과 환경에 대한 관심 증가로 더 많은 폐기물이 새로운 자원으로 재활용되었다. 산업 공생과 거기서 파생된 도시 공생⁴⁶⁾은 폐기물 재활용을 달성하기 위한 궁극적이고 가장 혁신적인 접근법이며 녹색 경제 성장을 촉진하고 저탄소 도시들을 건설하는 데 더욱 중요한 역할을 할 것이다. 한편 정부와 학자들은 도시-지역 수준의 산업공생 이론에 더 많은 관심을 기울이고 연구하여 폐기물 재활용의 가치를 더 잘 개발하고 폐기물 재활용 효율을 높이고, 시장 메커니즘의 역할을 최대한 수행하여 순환지역들을 구축해야 한다⁴⁷⁾. 그러면 지역 내 각 주체가 자원 보완 상호 작용, 공생, 상호 이익의 과정을 형성할 수 있고 그 지역 내 유닛들의 통합과 조정이 강화될 수 있으며 생태적 영역이 더 많이 형성되어⁴⁸⁾ 천연자원 절약, 생태 환경 보호 및 인간과 자연의 조화로운 공존의 목표를 달성할 수 있다.

<원문제목> Modeling of Waste Flow in Industrial Symbiosis System at City-Region Level: A Case Study of Jinchang, China
<원문출처> Sustainability

43) Lu, C. Study on System Evolution and Symbiosis Effects of Industrial Symbiosis-Case of Jinchang. Ph.D. Thesis, Lanzhou University, Lanzhou, China, 2013.

44) Lu, W.; Zhang, T. Research and Prospects of Waste Recycling. Environ. Sci. Manag. 2010, 35, 129-139.

45) Laybourn, P.; Lombardi, D.R. Industrial Symbiosis in European Policy. J. Ind. Ecol. 2012, 16, 11-12.

46) Fujii, M.; Fujita, T.; Dong, L.; Lu, C.P.; Geng, Y.; Behera, S.K.; Park, H.-S.; Chiu, A.S.F. Possibility of developing low-carbon industries through urban symbiosis in Asian cities. J. Clean. Prod. 2016, 114, 376-386.

47) Adriaanse, A.; Bringezu, S.; Hammond, A.; Moriguchi, Y.; Rodenburg, E.; Rogich, D.; Schütz, H. Resource Flows—The Material Basis of Industrial Economics; World Resources Institute: Washington, DC, USA, 1997.

48) Brunner, P.H.; Baccini, P. Regional materials management and environmental protection. Waste Manag. Res. 1992, 10, 203-212.